

東京一昭和基地回線における JJY10 MHz 波 の伝搬特性

杉内英敏*・山崎一郎**・城 功*・小宮紀旦*

Propagation Characteristics of JJY10MHz Waves on the Circuit between Tokyo and Syowa Station

Hidetoshi SUGIUCHI*, Ichiro YAMAZAKI**, Isao SHIRO*
 and Noriaki KOMIYA*

Abstract: The field strength of the standard frequency waves (JJY) at 10 MHz, measured at Syowa Station in Antarctica, for two years from January 1974 through December 1975 was compared with the value derived from the prediction method which is based on the CCIR Interim Method.

According to the diurnal variation obtained, the predicted strength shows a good agreement with the measured values when the MUF of the circuit (Tokyo-Syowa) exceeds sufficiently the operating frequency. On the other hand, the predicted strength shows a large difference from the measured value when the MUF is comparable to or below the operating frequency. This discrepancy is considered to be caused partly by the E_s propagation mode which is not taken into account in the prediction method.

The examination is made in this paper for other anomalous propagation mode such as the off-great circle path associated with the ground side-scatter, including the deviative absorption loss.

The reception rate is also investigated statistically for the purpose of establishing Tokyo-Antarctica communication circuit.

要旨: 昭和基地において、1974年1月から1975年12月までに測定された JJY 10 MHz 波の受信強度と、CCIR により採択された電界強度の暫定計算法を基にした計算法による値との比較を行った。その結果、東京一昭和基地回線における受信強度の日変化は、計算による最高利用周波数が、受信周波数に比し十分高いときには計算値に合致するが、受信周波数と同等、またはそれ以下となる時間帯では大

* 郵政省電波研究所。Radio Research Laboratories, 2-1, Nukui-Kitamachi 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184.

** 郵政省電波研究所 稚内電波観測所。Wakkanai Radio Wave Observatory, 3-20, Midori 2-chome, Wakkanai-shi, Hokkaido 097.

きな差が認められる。その原因の一つは、計算法で考慮されていない E_s 層による伝搬モードが、 F 層衰退時の極域において特に有効となるためである。また、地表および電離層の不規則性によって生じる大円通路を外れた側方散乱波の存在、電離層反射時の吸収等に対する考慮が、計算に含まれていないことが原因として考えられる。

本測定によって、この回線では年間を通じほぼ一定の通信可能時間帯が期待できることが判明した。

1. は じ め に

昭和基地では極域における電波伝搬特性解明のため、1958 年以降今日まで短波帯の電界強度測定が断続的に行われ、それぞれの解析結果が発表されている（栗城他，1961；WAKAI and WATANABE, 1961；長谷川他，1968；貝沼他，1972）。

電界強度測定の対象局として望ましいことは、送信諸元が明確であって、電力、周波数が安定していること、運用時間が連続であることである。これらを満足するものとして標準電波があり、過去にも測定が行われた。しかし各国の標準電波は、一般に同一周波数を使用しているため、相互混信により希望局の識別が難しいという難点があった。また、NHK 海外放送波等の測定も行われたが、運用時間が断続的であったため、日変化の解析に難点があった。

その後、狭帯域受信機を使用して標準電波の側帯波のみを選別受信する方法が開発された（若井他，1971）。この方式によって変調周波数の異なる局は容易に分離され、また同一変調周波数の局が存在しても、タイムスケジュールの相違からの識別が可能となり、信号強度の連続記録が得られるようになった。昭和基地では、1973 年以降この方式によって 10 MHz、15 MHz 帯の標準電波の受信強度測定が継続して行われている。

電界強度計算法は、従来ソ連の Kazantzev 法、西ドイツの Beckmann 法、イギリスの Piggott 法など各国それぞれ独自の方法が開発され使用されてきた。わが国では宮氏の方法が主として用いられ、アメリカの NBS 法等との比較検討が手計算によってなされてきた。CCIR（国際無線通信諮問委員会）は計算法の確立のための作業を行い、1970 年のニューデリー総会において新しい計算法を暫定法として採択した。電波研究所は、この計算法を基にしたコンピュータによる計算法を開発し（一之瀬他，1971）、種々の回線に対して通信可能な周波数帯、時間帯の予報を行っている。また、この計算法によって電界強度測定結果の解析に費やされる労力が、大幅に軽減されるようになった。

昭和基地での測定によって JJY, BPV, WWV, WWVH の各局の受信強度記録が得られ

ているが、ここでは第 15 次および第 16 次越冬観測（1974 年 1 月～1975 年 12 月）において得られた、JJY の 10 MHz 波を対象として、上記計算法との比較を行ったので、その結果について報告する。

2. 測 定 の 概 要

2.1. 送信局諸元

送 信 局	標準周波数報時局 (JJY)
送 信 位 置	小金井市 35°42' N, 139°31'E
周 波 数	10 MHz
変調周波数	1 kHz
変 調 度	65%
搬送波出力	2 kW
空 中 線	$\lambda/2$ 垂直ダイポール
送 信 時 間	24 時間連続

2.2. 受信局諸元

受 信 局	南極昭和基地
受 信 位 置	69°00'S, 39°35'E
受 信 機	NRD-11E 型全波受信機
受信周波数	10.001 MHz
帯 域 幅	100 Hz
空 中 線	逆 L 型 ($h=10$ m, $l=30$ m)
記 録 計	KRB 型直流記録電流計, 記録紙送り速度 60 mm/H

2.3. 伝 搬 距 離

表 回 り	14008 km
裏 回 り	26000 km

2.4. 測定値の較正

受信機入力端における電圧の較正は、標準信号発生器によって記録紙の交換時に行われている。

アンテナ系の較正は、信号が比較的安定して受信される時刻に携帯用電測器を使用して電界強度 (E) を測定し、それと同時刻に記録紙上に得られた受信機入力端電圧 (V) とから較正係数 (A) を次式のように求めた。

$$E_{(\text{dB})} = V_{(\text{dB})} - A_{(\text{dB})}$$

ただし本測定は JJY の高側帯波のみ受信するため、2.1. 項で示されるように、周波数は 10.001 MHz となり、有効出力 P は P_0 を搬送波出力、 m を変調度とすれば、 $P = P_0 \cdot m^2 / 4$ により 0.21 kW である。したがってこれに対する補正を行った上で、較正係数 (A) は求められている。しかし、アンテナはブリザードの被害等により多少変更されることもあった。この場合もアンテナ特性は変らないものと見なしたが、この他較正は若干の誤差を含むので、得られた値を相対的な入射波電界強度と見なして、計算値との比較を行っている。

3. 測定結果と考察

3.1. 受信強度の日変化特性

10 MHz の標準電波局のうち、JJY と同様に 1 kHz 変調により、電波を送信している局のリストおよびタイムスケジュールを、それぞれ表 1 と図 1 に示す (CCIR, 1974)。昭和基地での JJY の受信記録を示す図 2 の例から分かるように、BPV 局以外の影響は無視できるので、BPV 局の影響のない時間帯にあたる、毎時 00 分より 10 分の間の平均値をその時刻の JJY 局の受信強度とした。

表 1 1 kHz 変調による 10 MHz 波を発射している標準電波局

Table 1. Standard frequency transmission stations radiating 10 MHz carrier waves with 1 kHz modulation.

コールサイン	送信位置	緯度 経度	空中線	搬送波出力	運用時間
JJY	小金井市 (東京)	35°42'N 139°31'E	$\lambda/2$ 垂直ダイポール	2 kW	24 時間連続
BPV	上海 (中国)	31°12'N 121°26'E	無指向性	5-15 kW	24 時間連続
ATA	ニューデリー (インド)	28°34'N 77°49'E	水平ダイポール	2 kW	月曜日から金曜日 0530-1030UT
LOL	プエノスアイレス (アルゼンチン)	34°37'S 58°21'W	水平ダイポール	2 kW	日曜日を除き 1100-1200, 1400-1500 1700-1800, 2000-2100 2300-2400UT

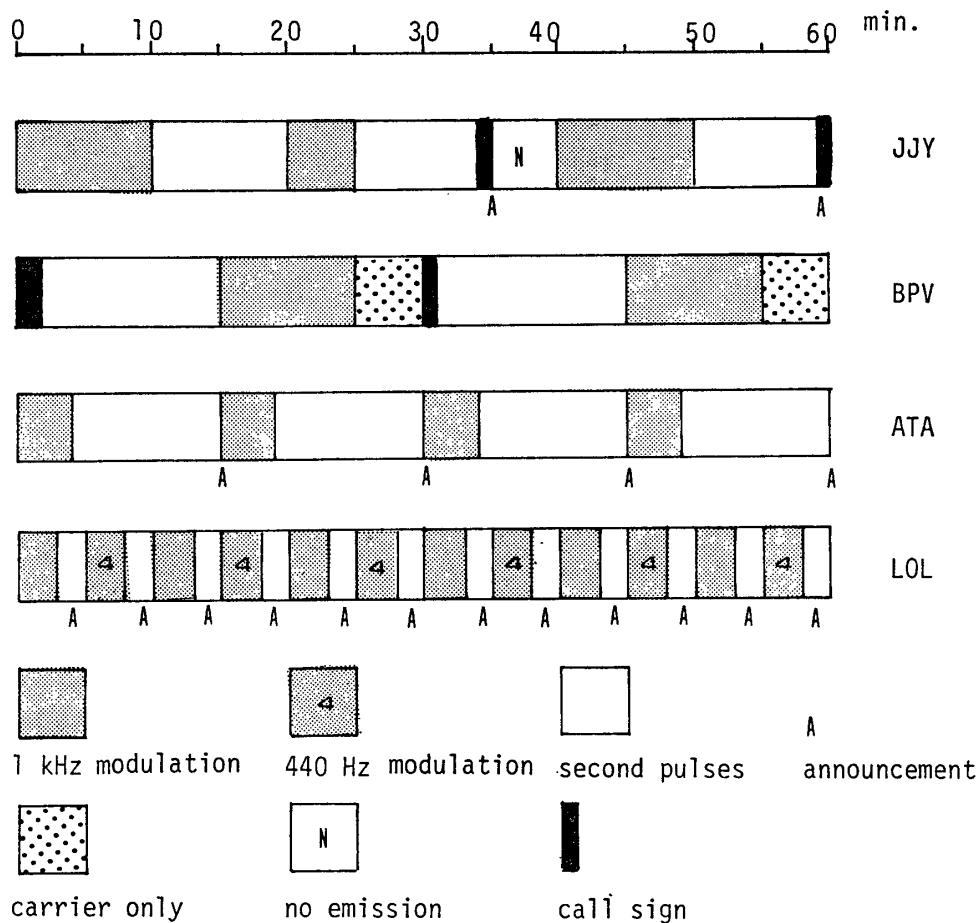


図 1 表 1 に示される標準電波局の毎時の発射スケジュール

Fig. 1. Hourly radiation schedules at the stations listed in Table 1.

図 3 は、測定した受信強度ならびに受信率と、電界強度計算法による計算結果との比較を示している。測定された受信強度の月中央値は、黒丸で示されている。また受信率 (R) は各時刻において JJY が受信された日数と全測定日数との比であり、月間の百分率として柱状グラフで示されている。さらに大圏コース表回り伝搬波に対し、計算により得られた最高利用周波数 (MUF) が、点線の曲線で示されている。

電界強度は、電離層吸収を含む伝搬通路の諸要素を評価して計算されるが、計算による MUF が、運用周波数を下回る場合には伝搬モードは存在せず、したがって電界強度は計算できないはずである。しかしながら E_s (スプラディック E 層) 伝搬モード、大地散乱による MUF 以上の伝搬モード等、計算に考慮されていない伝搬も起こり得るし、実際にも受信されているので、本文では MUF が運用周波数を下回る場合にも、他の条件はすべて同じとして受信強度を計算するようにした。すなわち図 3 において、MUF が

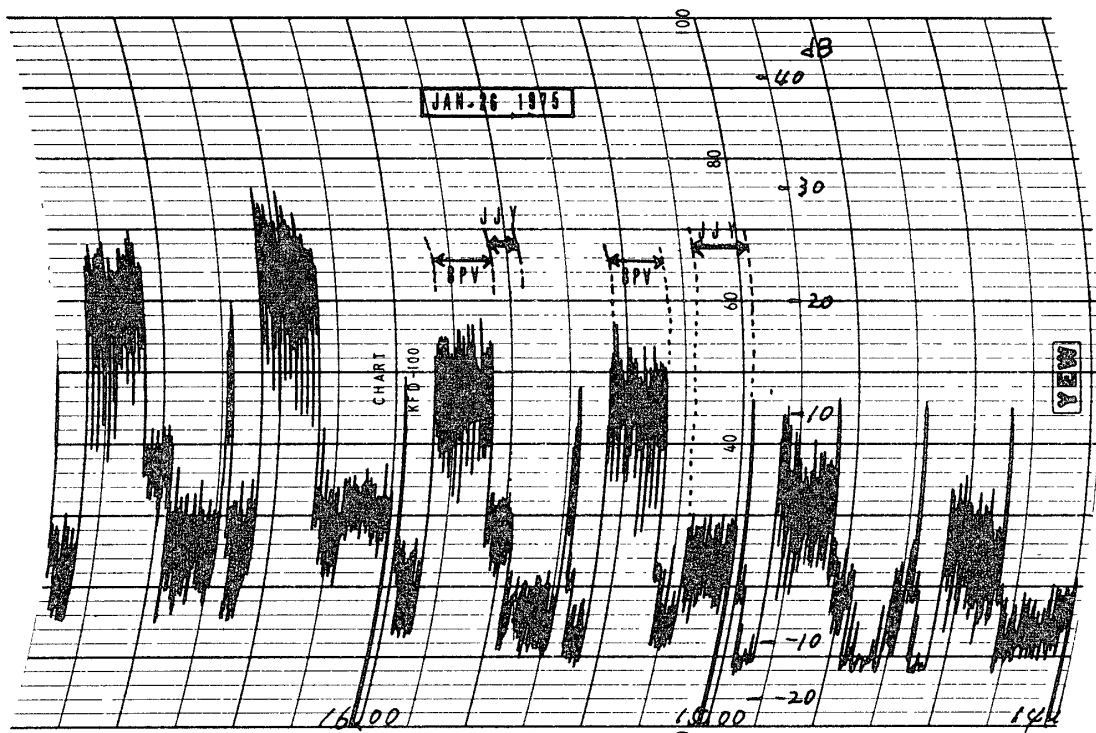


図 2 狭帯域受信機による標準電波測定記録例

Fig. 2. The examples of record of standard frequency waves received with the narrow band receiver.

10 MHz 以上であるときの値に対しては実線で、10 MHz 以下に対しては、破線によって電界強度曲線を示した。

裏回り伝搬波に対しても、同様な計算を行った。しかし、後に示す例のように、全般に表回りに対して電界強度は微弱であるため、ここでは図示されていない。

これら日変化曲線で明らかのように、昭和基地が午後になると信号が受信されるようになる。この入感時刻は計算による入感時刻にほぼ一致し、定性的には大圏コース全体が下部電離層による電波吸収の少ない時間帯に含まれたことで説明される。受信率の小さい月には、受信強度と計算値は異なる日変化を示す場合もあるが、総体的には受信強度は、電界強度の計算曲線に沿って増加し、その後 MUF 計算曲線の低下に伴って減少する。これらのことから受信強度の減少には、F 層反射時の吸収が寄与しているものと思われる。

さらに計算上の MUF が 10 MHz 以下となっても受信は継続される。特に、昭和基地における冬季の 6、7 月には、むしろこの時間帯に受信率が高くなる傾向も示されている。

ここに用いた計算法は、古典的 MUF と正規伝搬を基礎にしている。したがって計算

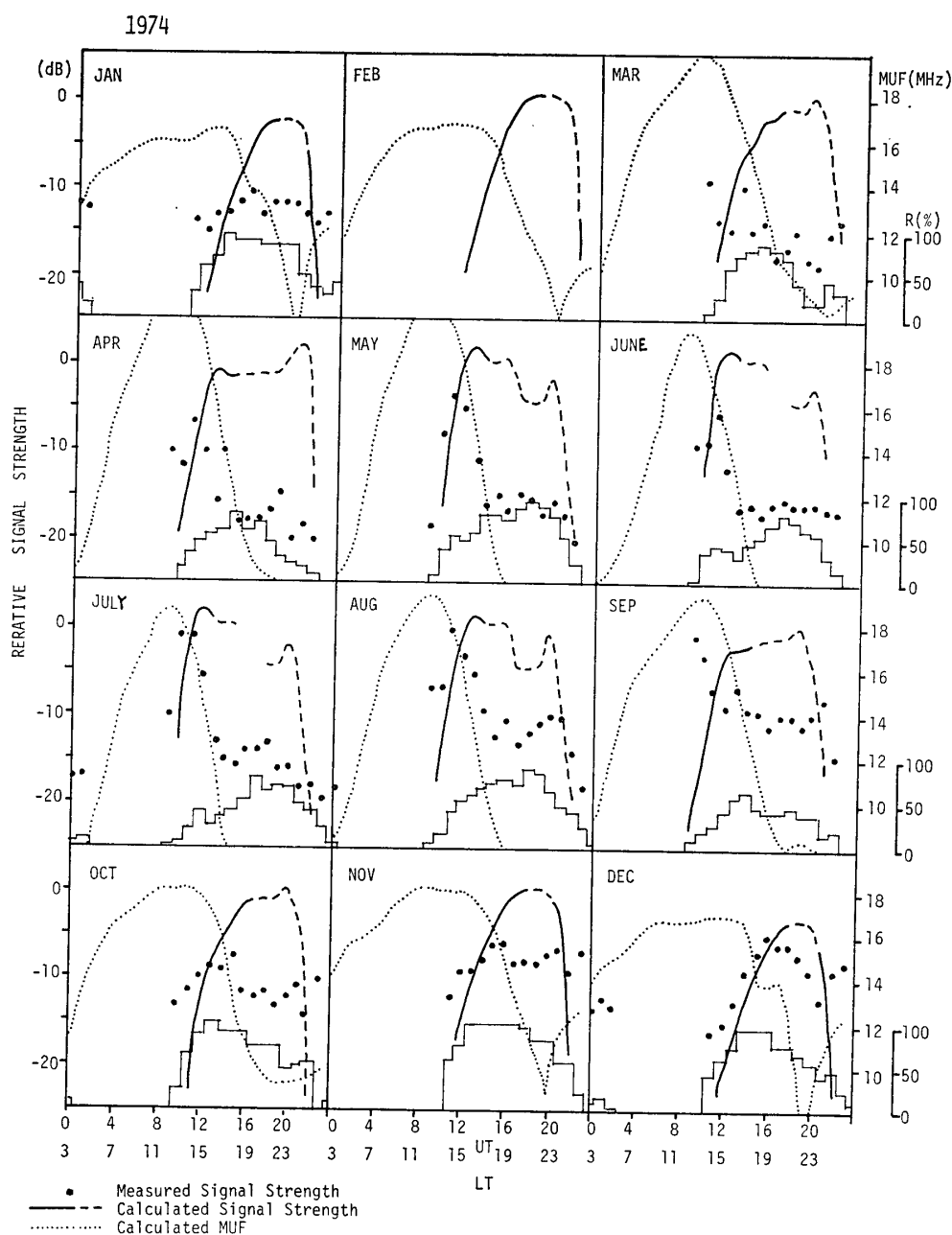


図 3a JJY 受信強度と計算値の比較 (1974 年)

Fig. 3a. Comparison between the received and calculated signal strengths of JJY in 1974.

法は E_s 層による伝搬, および側方散乱等の異常伝搬モード, ならびに電波が電離層で反射する際に受ける偏倚吸収を考慮していない. これらが計算値と実測結果との間に大きな相違をもたらす原因となっていると考えられる.

古典的 MUF は, 電波が大円通路上を電離層による屈折のみで伝搬するときの最高使

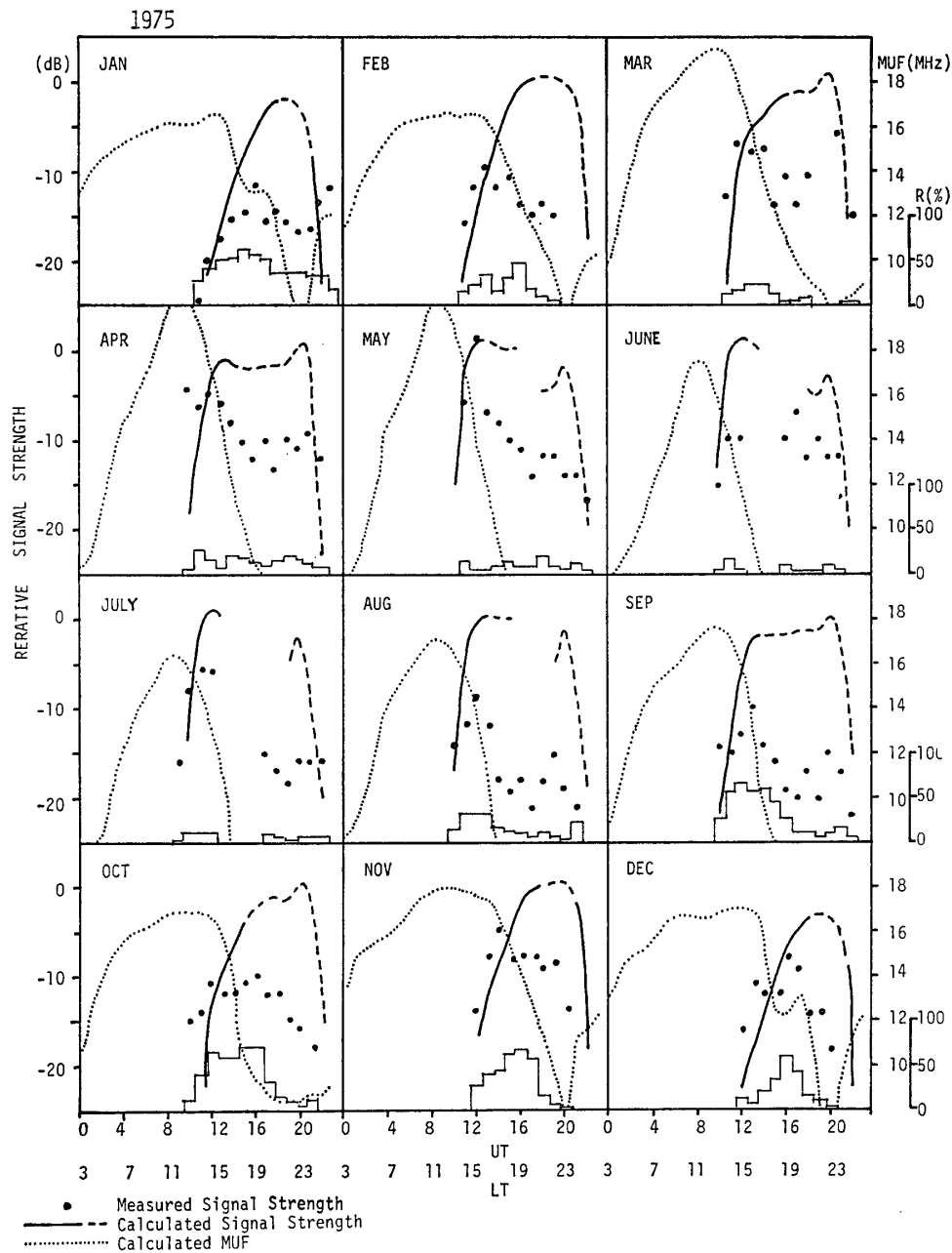


図 3b JYJ 受信強度と計算値の比較 (1975 年)

Fig. 3b. Comparison between the received and calculated signal strengths of JYJ in 1975.

用周波数を示すものであるが、実際には電離層の不規則性により、散乱や電離層ダクトの形成等による伝搬モードが発生し、MUF を増加させることが多い。また受信強度も計算値より大きくなる場合もある。

一般に赤道横断伝搬波は、赤道の両側に形成される高電子密度の F 層間を地上反射を

介することなく、しばしば遠距離まで伝搬することがよく知られており、本回線にもこのような伝搬モードが介在していると思われる。また西ドイツ・オーストラリア間の伝搬実験結果からは、日没時の電離傾度の不規則性により、回線の夜間側に電離層ダクトが形成され、それによる長距離伝搬モードが存在することも報告されている (CCIR, 1978)。

また、大地の不規則性により大圏コースを外れて側方に散乱した電波が、回線の実効的 MUF を増加させる原因となることも知られている。極地方では、オーロラ発光時に電離層内に大きな不規則性が発生し、それによる散乱波モードが存在する (BATES *et al.*, 1966)。さらにオーロラ域特有の E_s 層による反射波も、極地方の伝搬に大きな影響を与えるものと考えられる。

測定された受信波にはこれら各種モードの影響が含まれると考えられるが、MUF が 10 MHz を越える、いわゆる正規伝搬モードと見なせる場合を除き、ここでは主として MUF が 10 MHz 以下のとき受信される信号と極域の電離層との関連について考察を進めることにする。

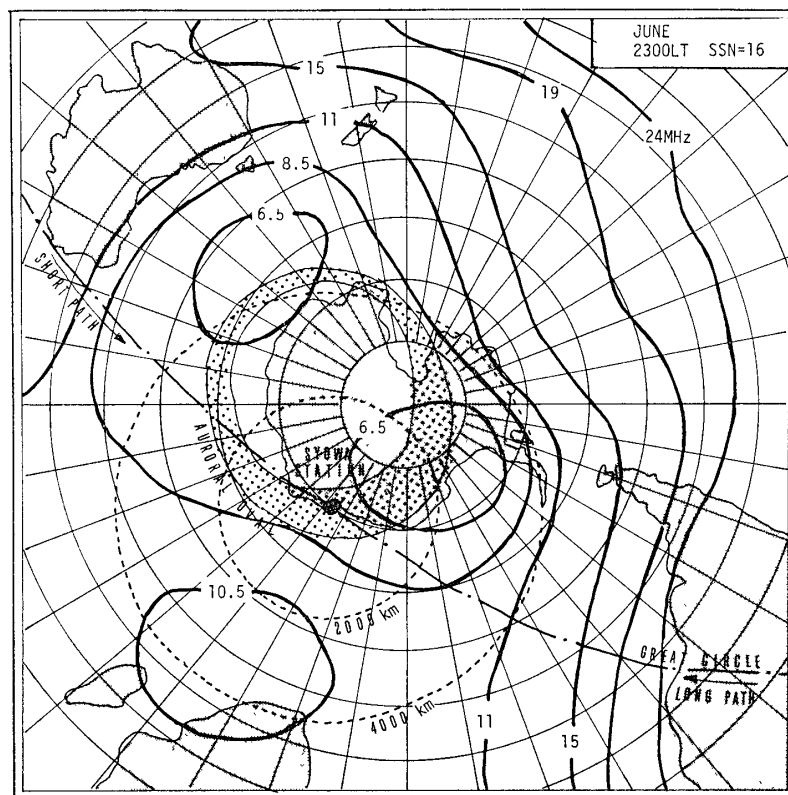


図 4 極中心に示した MUF(4000)F, 大円通路およびオーロラ域

Fig. 4. MUF (4000) F, auroral oval and great circle paths shown on the polar diagram.

3.2. 裏回り伝搬波

表回り伝搬波に対する MUF が低下する時間帯は、受信点の夜間にあたる（送受信点間の時間差は 6 時間）。このとき裏回り通路の大部分が昼間となるので、その MUF は使用周波数以上となり、通路長の増大等による吸収増加にもかかわらず、受信が可能と考えられるが、ここでは最初にこの点についての検討を行った。

図 4 は、正規伝搬波以外の信号が高率で受信されていると考えられる 6 月の 2300 LT における電離層分布を、Atlas of Ionospheric Characteristics (CCIR, 1966) に基づいて極地方中心に示したものである。図中等高線で示した MUF(4000)F は、電波が 1 回の F

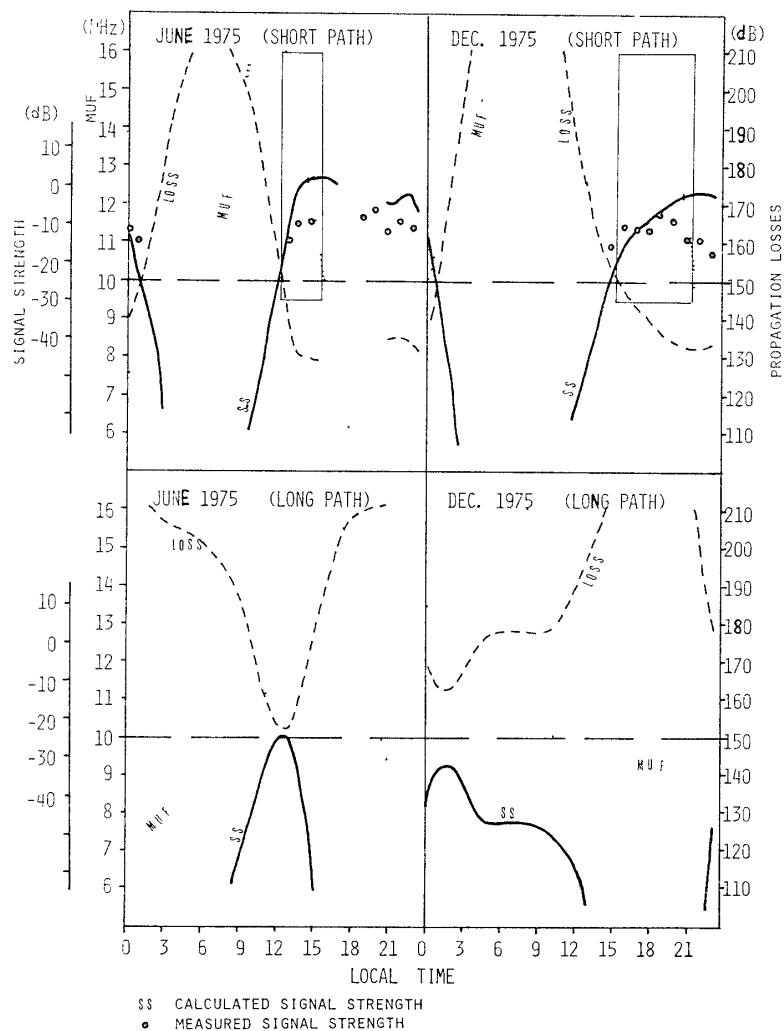


図 5 6月および12月（1975年）の表回り、裏回り伝搬路に対する計算曲線と実測値

Fig. 5. The calculated and the measured signal strengths for the waves via short and long great-circle paths in June and December, 1975.

層反射によって 4000 km 伝搬するとき、中間点における F 層が反射し得る最高の周波数であって、上記の時刻と太陽黒点数 16 の条件下で計算された値である。図には昭和基地を中心とした 2000 km および 4000 km の等地表距離線（破線）が示されているが、ここで明らかなように基地から 2000 km の MUF (4000) F は 10 MHz 以下であり、この時刻では大圏コース上の F 層伝搬波は表回り、裏回り共存在しないはずである。図 5 には 6 月および 12 月における表回り、裏回り通路のそれぞれに対して計算された伝搬損失、電界強度および MUF が示されている。表回りの図には、 F 層正規伝搬モードによる通信可能時間帯が実線の枠で示され、実測値を黒丸で併記した。枠内には正規 F 層モードによると思われる信号が受信されているが、特に 6 月においてはその他の時間帯にも多く信号が受信されている。この時間帯に表回りに対して計算された電界強度値は、受信強度に対応しているが、裏回り伝搬路に対し計算された結果では、この時間帯は伝搬損失の著しく増大しているときに相当している。さらに 6 月における裏回りの MUF は、通路が昼間側であっても極地における F 層の電子密度の低下による制限を受けて、21 時以降は、10 MHz 以下と計算されている。

以上のことから、本測定には裏回りの F 層正規伝搬モードによる信号はほとんど受信されず、6 月において入感時付近に影響がある程度と推察される。

3.3. オーロラ性 E_s 層による伝搬

オーロラ域の E_s 層は地磁気緯度 70° 付近で最も多く生成され、その発生率は地磁気活動度に比例すること等がよく知られている。オーロラ性 E_s 層に関する実験例として、カナダで行われた地上からのパルスサウダの信号を、オーロラ域を飛行する航空機によって受信し、斜入射のイオノグラムを得た実験がある (JULL *et al.*, 1962)。その結果、特に地磁気じょう乱時に E_s 層が頻度高く観測され、その層の状態に応じて周波数を適当に選べば、通常予報計算によって運用されている周波数のみによる通信に比し、大幅に不通時間を軽減できることが報告されている。また昭和基地での過去の電界強度測定結果でも 6 月においては、 E_s 層の MUF を使って計算すると実測値によく一致することが報告されている (長谷川他, 1968)。

図 4 にはオーロラ域が示されている。この領域は地磁気の活動度に応じて変動するが、平均的にはここに表されるごとく、ほぼ本回線の大圏コースに沿う形で存在するので、ここで生成される E_s 層が伝搬に大きな影響を与える。特に 6, 7 月の夜間に得られた受信

記録は、 E_s 伝搬モードを含む典型例といえる。すなわち、図 4 の例について前述したごとく、冬季にあたるこの時期では、極域全体にわたり F 層電子密度が低下する。計算値が月中央値を示すことを考慮しても、 $MUF(4000)F$ が 10 MHz 以上に保たれる確率は少く、図 3 (a) の同時期の受信率ほど高くはなり得ない。また同図の日中から午後にかけては、受信強度日変化曲線と MUF 曲線がよく対応するので、 F 層伝搬モードが主役を演じていることを示し、冬季では、約 16 時を境に極域の伝搬モードが F 層から E_s 層に移り変ることが分かるであろう。

E_s 層の生成とその伝搬への寄与は昭和基地での電離層、オーロラおよび地磁気の観測結果との対応を調べることでさらに明確に示される。

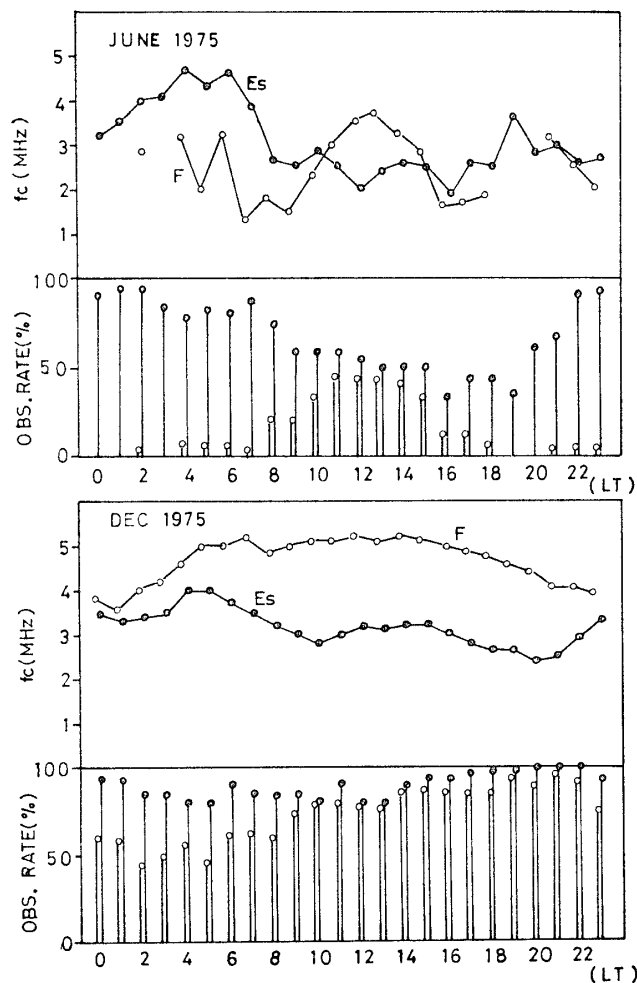


図 6 昭和基地で観測された F 層、 E_s 層の季節による特性

Fig. 6. Characteristics of the ionospheric F and E_s layer observed at Syowa Station in June and December, 1975.

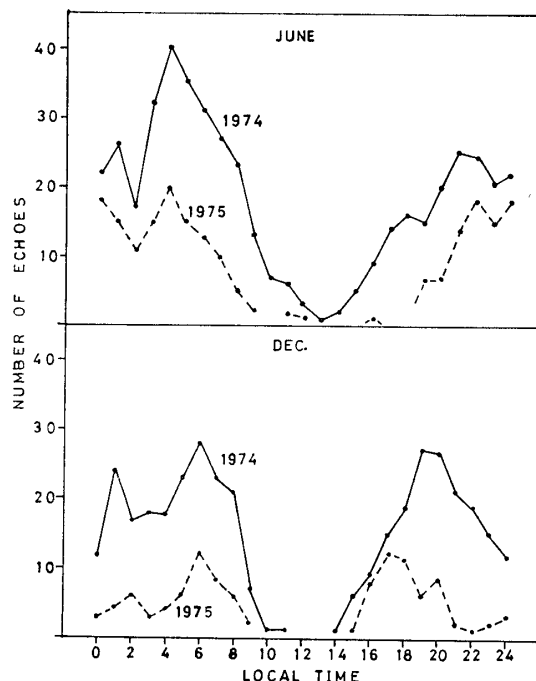


図 7 昭和基地における 50 MHz オーロラレーダによるエコーの日変化
 Fig. 7. Diurnal variation of the auroral radar echoes measured at 50 MHz at Syowa Station.

図 6 は、1975 年 6 月および 12 月の F 層、 E_s 層の臨界周波数と、それらの層の観測率を表したものであり、 F 層、 E_s 層をそれぞれ白丸と黒丸で示してある。図によれば 6 月の F 層は 18 時以降 9 時頃までは電子密度が E_s 層に比べて低く、 E_s 層にしゃへいされることが多いためほとんど観測されず、 E_s 層は夜間に出現率が高いことが分かる。12 月においては、両者とも顕著な日変化を示さない。

図 7 には、昭和基地での 50 MHz オーロラレーダによるエコー出現率が示されている。出現率は両月とも、9 時頃より 16 時頃の間には谷がある点で共通している。前図の 6 月の E_s 層にもこれとほぼ同様な傾向が見られ、本文の主題である受信強度測定結果でも、冬季にあたる 5 月から 7 月にかけて、この時間帯に受信率が低くなっている。

地磁気活動度と受信率の関係が図 8 に示されている。縦軸は昭和基地の地磁気 K-指数を示し、横軸は地方時を示しているが、横軸は、1 時間毎の目盛幅を 100% とする受信率を示すためにも使用されている。図にはそれぞれの K-指数に対する受信率が示されている。たとえば、1974 年 6 月 12 時において K-指数が 0 であった日数の 50% は、受信強度の記録が得られたが、他の指数の日々には受信されなかったことを示している。ここで、1975 年は JJY の受信率が非常に低かったので、BPV 局の受信率について同様の処理を

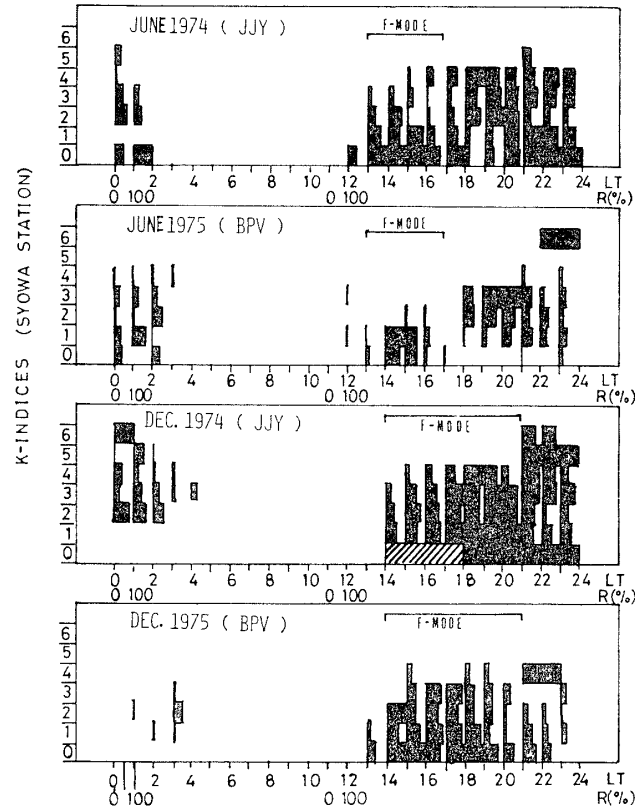


図 8 地磁気指数と標準電波受信率の関係

Fig. 8. Correlation between the geomagnetic K-indices and the reception rate of the standard frequency radio waves.

行った (BPV 局の受信強度解析結果は, JJY 局とほぼ同様な特性を示す). また 1974 年 12 月の 14 時から 18 時の間は, K-指数 0 の日がなかったので受信率 0 と区別するため, 斜線によってそれを示した. 図によれば, 計算で予報された F 層モードによる通信可能時間帯 (図中 F-MODE と示してある) では, K-指数の高いときは受信率は低下するが, その他の時間帯では, K-指数の高いときでも高受信率を得ている. このことは地磁気活動度と E_s 層の発生率が比例することに対応し, E_s 伝搬モードを示唆するものと考えられる.

以上, JJY 受信強度と各種観測結果との関連および MUF (4000) F の予報計算値等との総合的な比較検討によって, F 層による正規伝搬時間帯以外に受信される信号は, オーロラ域に生成される E_s 層による反射波が主要なものであると推論される.

5. お わ り に

計算による通信可能時間帯以外に受信される信号は, E_s モードによるものの他に, 前に示した側方散乱波等, 大円通路を外れた伝搬波の存在を無視することはできない. しか

し、これらのモードによる受信信号は、 E_s 伝搬モードのごとき顕著な特性を示さず、また強度も E_s 反射波に比し弱いと考えられる。本測定では受信方位の測定は行っておりなく、さらに標準電波の側帯波のみを受信する方式であるので、弱い各種の伝搬モードによる信号は、検出されないことも考えられる。したがって現時点においては、これらのモードの受信波に及ぼす影響についての定量的な検討は、不可能と思われる。

今回の測定は、太陽活動度の最も低い時期に当り、また整理の都合上 10 MHz 波の記録に対してのみ解析を行ったが、本回線における基本的な伝搬様式を把握できたと考える。

測定値は、前述のごとくある程度アンテナ系較正法等による誤差を含んでいるので、計算値との厳密な比較はできないが、受信強度の日変化曲線と電離層、オーロラレーダおよび地磁気データとの関連から、ほぼ次のことが結論される。

- 1) 入感時から受信強度最大となる時刻までの強度変化は、相対的に計算値とよく一致する。
- 2) F 層 MUF の低下後、伝搬損失の少ない時間帯では、オーロラ域に生成される E_s 層によって、主に回線が維持されるので、極地方伝搬波に対する電界強度の計算には、この E_s 層に対する考慮が特に重要である。
- 3) 計算法には F 層反射時の偏倚吸収に対する考慮が必要である。
- 4) 極域における F 層、 E_s 層両伝搬モードにより、本回線における通信可能時間帯は年間を通じほぼ一定に保たれる。

本測定のように赤道を横断し、遠距離伝搬する電波の極地における測定結果には、多くの要素が含まれ、複雑であり、厳密な解析はきわめて困難である。今後引き続きアンテナ系を含めた機器の整備を行い、電界強度の絶対値を得ること、周波数特性を調べることで等により、さらに極地方の伝搬様式解明のために定量的な研究が必要と考える。

謝 辞

本報告の取りまとめに際し、電波研究所若井電波部長、栗城電波伝搬研究室長、前田電波予報研究室長、竹之下主任研究官に種々助言を頂いた。また大瀬主任研究官、一之瀬研究官には資料解析に関し、種々ご協力頂いた。ここに深謝いたします。

文 献

BATE, H. F., ALBEE, P. R. and HUNSUCKER, R. D. (1966): On the relationship of aurora to

- non-great circle high frequency propagation. *J. Geophys. Res.*, **71**, 1431–1420.
- CCIR (1966): CCIR atlas of ionospheric characteristics. Report, 340, XIth, Plenary Assembly, Oslo.
- CCIR (1974): Standard frequency and time signals. Report, 267–3, XIIIth, Plenary Assembly, Geneva.
- CCIR (1978): Long-distance ionospheric propagation without intermediate ground reflection. Report, 250–4, XIVth, Plenary Assembly, Kyoto.
- 長谷川貞雄・竹内鉄雄・磯部 進 (1968): 東京―昭和基地間の短波伝搬特性. 南極資料, **33**, 27–38.
- 一之瀬 優・山岡 誠 (1971): 電子計算機による MUF, LUF および短波空間波電界強度の計算法. 電波研季報, **17**, 480–498.
- JULL, G. W., DOYLE, D. J., IRVING, G. W. and MURRAY, J. P. (1962): Frequency sounding techniques for HF communication over auroral zone path. *Proc. IRE*, **50**, 1676–1682.
- 貝沼昭司・城 功・山岡 誠・一之瀬 優・坂元敏明 (1972): 南極昭和基地における短波伝搬実験結果. 南極資料, **45**, 1–11.
- 栗城 功・大瀬正美 (1961): 宗谷船上観測における短波電界強度の距離特性. 電波研季報, **7**, 288–292.
- WAKAI, N. and WATANABE, S. (1961): Ionospheric absorption of HF waves in high latitudes. *J. Radio Res. Labs.*, **8**, 413–423.
- 若井 登・藤井 周・宮本善行 (1971): 夜間の電離層吸収 I, 狭帯域受信機による南極船上電界強度測定. 電波研季報, **17**, 297–301.

(1978 年 6 月 10 日受理)